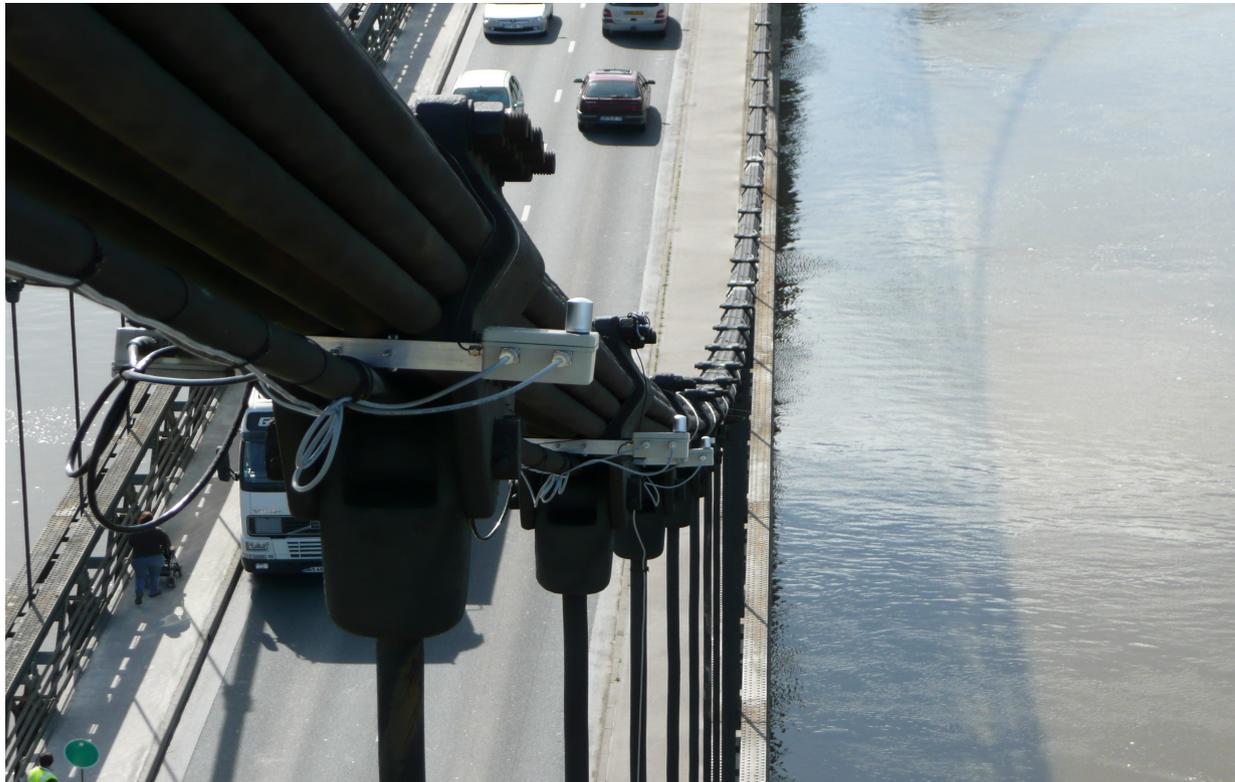


CASC : Capteur Acoustique pour la Surveillance des Câbles

Actualités en Recherche Développement



Vincent Le Cam @ Ifsttar
Directeur du Laboratoire **Structures et Instrumentation Intégrée**
Département COSYS

Sommaire :

- Pourquoi la surveillance des câbles ?
- La Méthode CASC :
 - Principe : détecter et localiser
 - Historique des versions
 - Zoom sur la version *PEGASE*
- Mises à jour de la plateforme
 - Technologiques
 - Scientifiques
- Perspectives



1) Pourquoi la surveillance des câbles

- Un câble est un organe **critique** des ponts suspendus, haubanés, à béton pré contraint...mix
- Pourtant **vulnérable** à :
 - La corrosion
 - La fatigue (travail mécanique, résonance,...)
 - La surcharge, malveillance, malfaçon (injection) ...etc
- Aux interventions compliquées, dangereuses et coûteuses ...
- **Le SHM des câbles de ponts est un enjeu stratégique**



Pont suspendu



Pont haubané



Pont à caisson pré contraints

1) Pourquoi la surveillance des câbles

Exemples de défaillances :



Fatigue



Corrosion



Défaut d'injection



1) Pourquoi la surveillance des câbles

Exemples de défaillances :



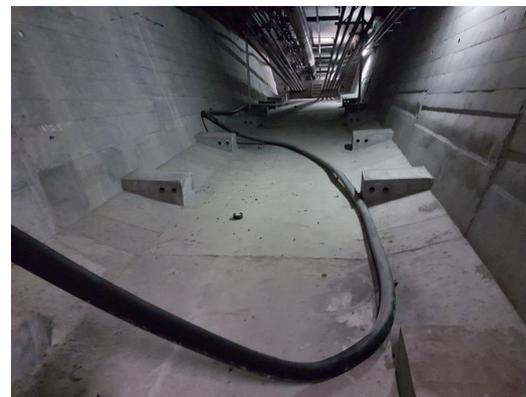
Pont de Tacoma 1941



Sully Sur Loire 1985



Pont de Gênes 2018

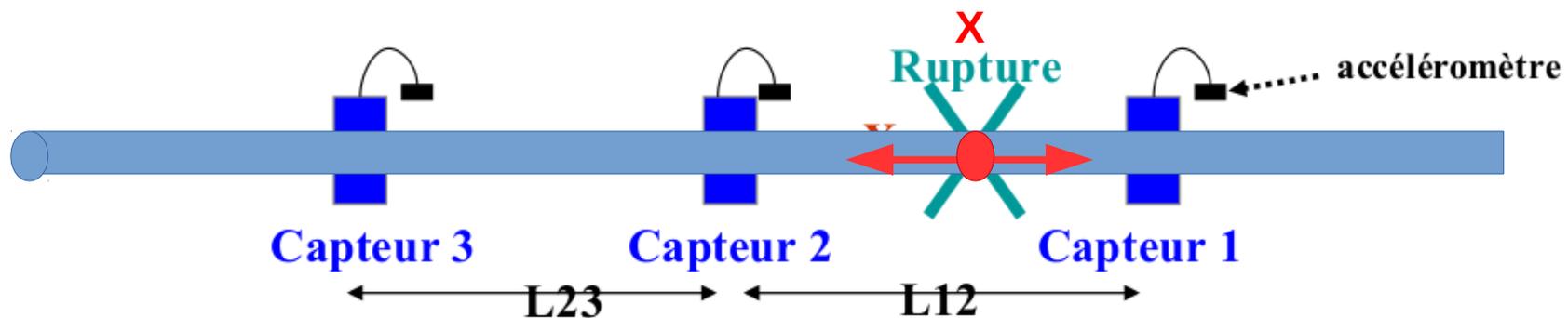


Pont de Île de Ré 2018

2) La Méthode CASC

Principe de la méthode CASC : détection et localisation des ruptures de fil

- La rupture d'un fil tendu libère une énergie se traduisant par une propagation d'onde (p et s) de part et d'autre du point **X** de rupture
- Une « distribution » de capteurs fixés le long du câble détectent le passage de l'onde (chaque capteur est doté d'un accéléromètre), par **comparaison à un seuil (g)**
- Chaque capteur effectue une **datation** et un enregistrement du signal et transmet ces informations à un Superviseur
- Le Superviseur évalue alors la vitesse de l'onde et, connaissant la position relative des capteurs, détermine le lieu **X** de la rupture.



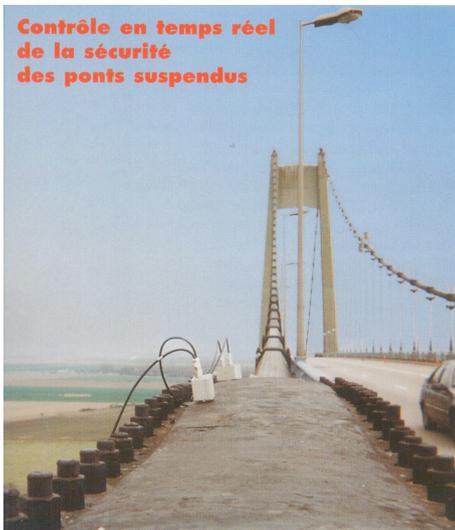
$$x = \frac{1}{2} * (L12 - v * \Delta t12) \text{ avec } v = L23 / \Delta t23.$$

Vitesse $V \sim 5000 \text{ m/s}$

Spectre 5 / 25 kHz

2) La Méthode CASC

Historique des versions de la plateforme CASC :



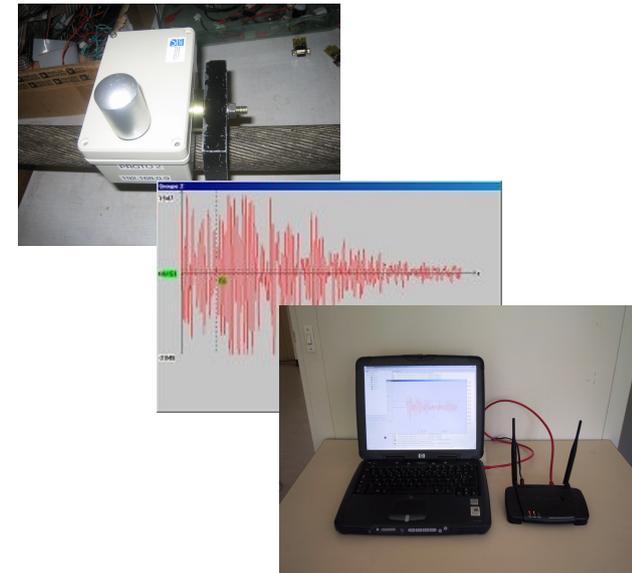
Version « inspection »
de chantier
Ex : Tancarville

Mesures de terrain



Version Armoire
Surveillance continue
Ex : Aquitaine, Ancenis,

*Mesures de terrain
industrialisée - info binaire*



Version PEGASE 1
Surveillance continue
Capteurs intelligents
Ex : Ancenis, St Nazaire...

*Mesures capteurs sans fil
restitution onde en $f(t)$
IHM*

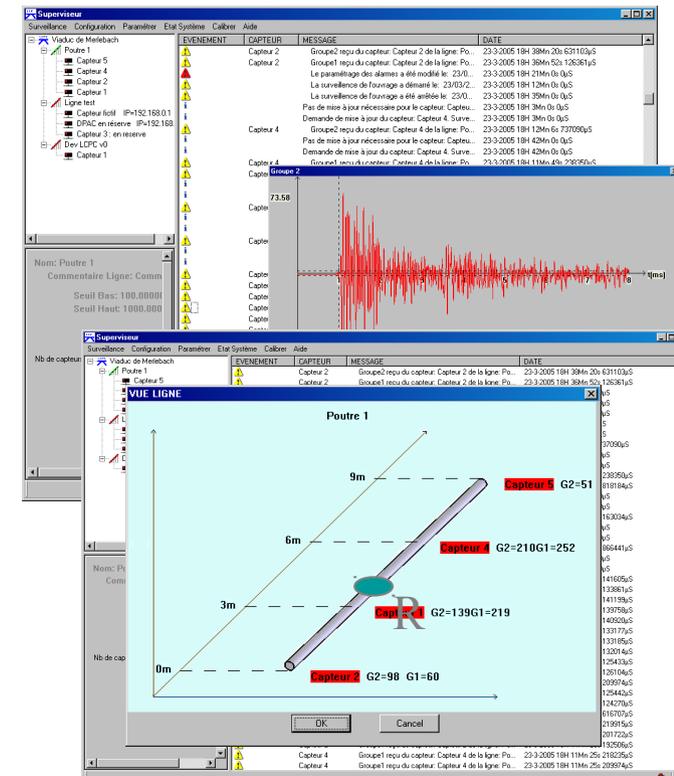
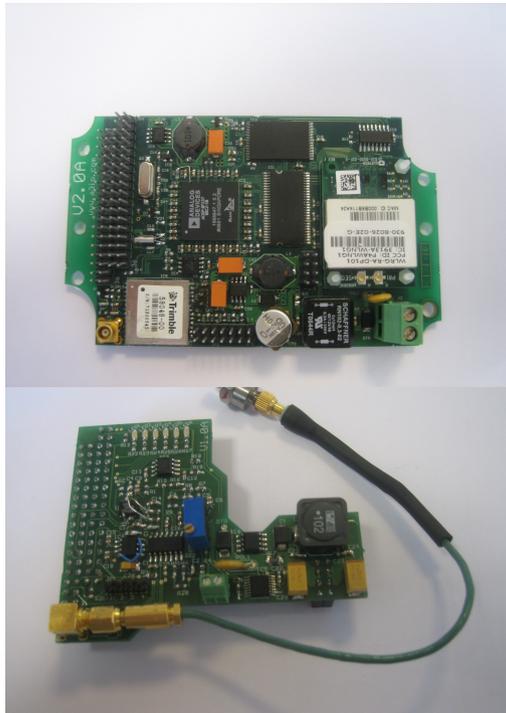
~2/3000 boitiers installés

2) La Méthode CASC

Zoom sur la version CASC « PEGASE 1 » (2010...)

Apports forts de cette version :

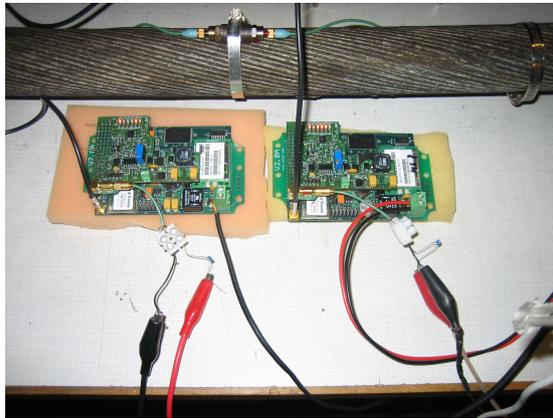
- Plus grande souplesse (paramétrage dynamique des seuil, ctrl des capteurs,...)
- Restitution **complète** de la forme des signaux en f(t) - intelligence embarqué (Linux)
- Réseau de capteurs sans fils avec challenge de la **synchronisation sans-fil**
- Échantillonnage à 250 kHz, 16 bits, accéléro acoustique...



2) La Méthode CASC

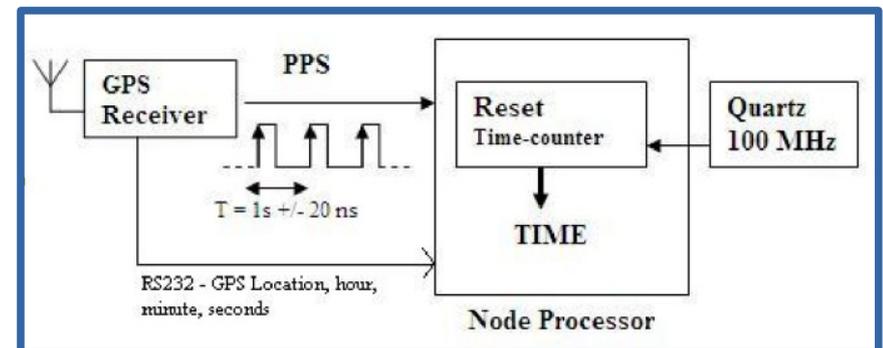
Zoom sur la version CASC « PEGASE 1 » (2010...)

Challenge de la synchronisation sur les réseaux de capteurs sans fil !



Challenge technico scientifique !

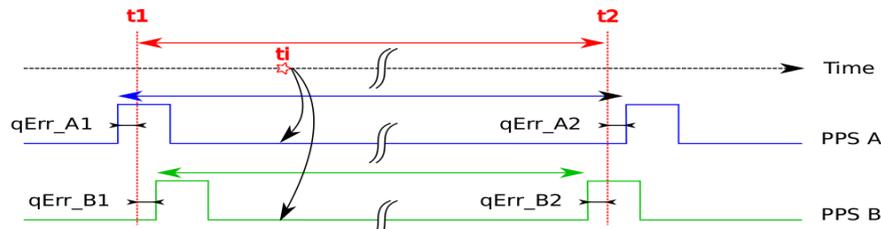
- Comment avoir une même base de temps entre 2 WSN : à la microseconde ?
- Solution GPS / PPS
- Codes de calculs embarqués temps réels
 - Exploitation tps-réel de codes corrections
 - Correction dérive des quartz
 - Auto apprentissage fréquence réelle
 - Prise en compte de l'effet de la $T^{\circ}C$
 - ...



2) La Méthode CASC

Zoom sur la version CASC « PEGASE 1 » (2010...)

Challenge de la synchronisation sur les réseaux de capteurs sans fil !



$$ti_{ns} = 10^{-3} \cdot qErr1_{ps} + \frac{cpt_{pas}}{period_{pas}} (10^9 \cdot 1_s - 10^{-3} \cdot qErr1_{ps} + 10^{-3} \cdot qErr2_{ps})$$

Seuil	Quantité
10 ns	947‰
20 ns	997‰
30 ns	999‰

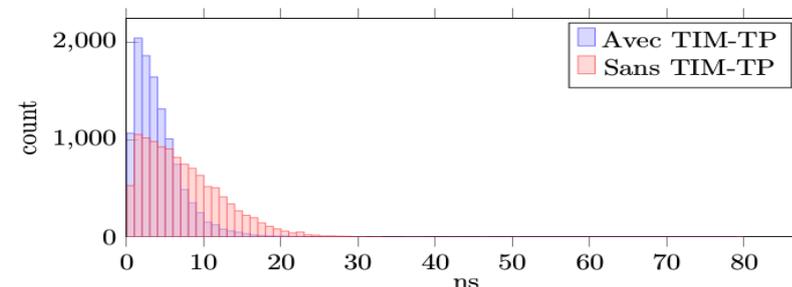


Figure 11: Histogramme des erreurs de synchronisation

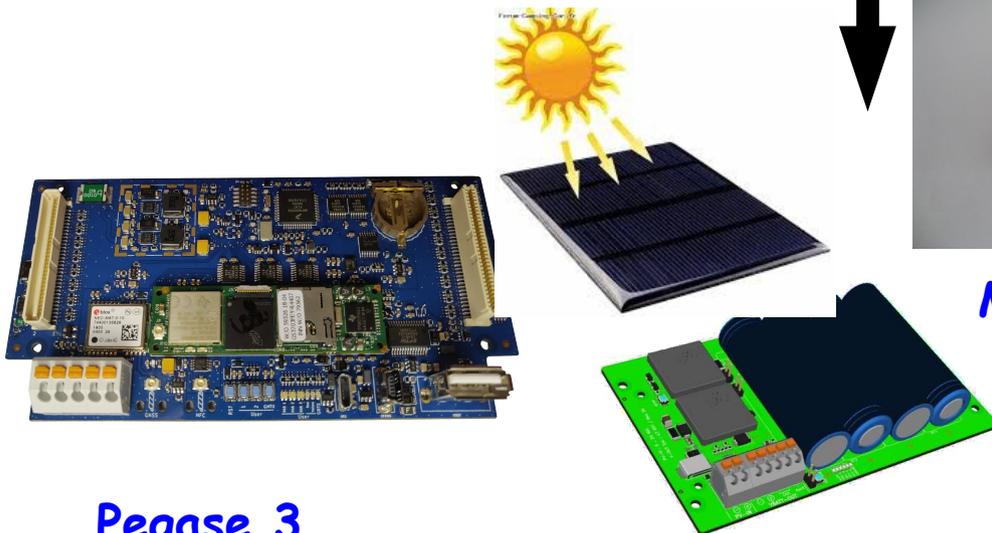
Résultat (reconnu international) : les capteurs PEGASE datent un même front à moins de 10 nanosecondes UTC !

3) Mise à jour « CASC nouvelle génération »

3.1 Mise à jour technologique :



Pegase 1



Multivoies

Pegase 3

Carte fille Power



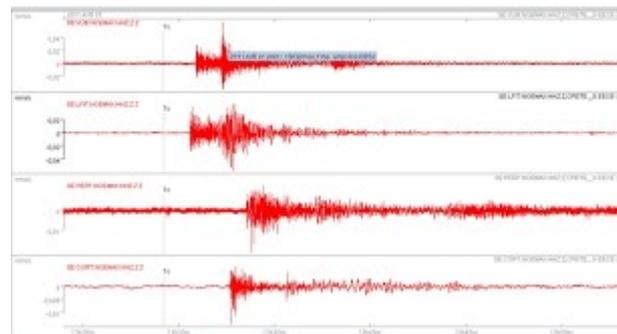
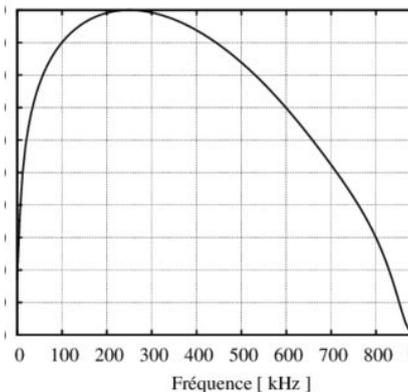
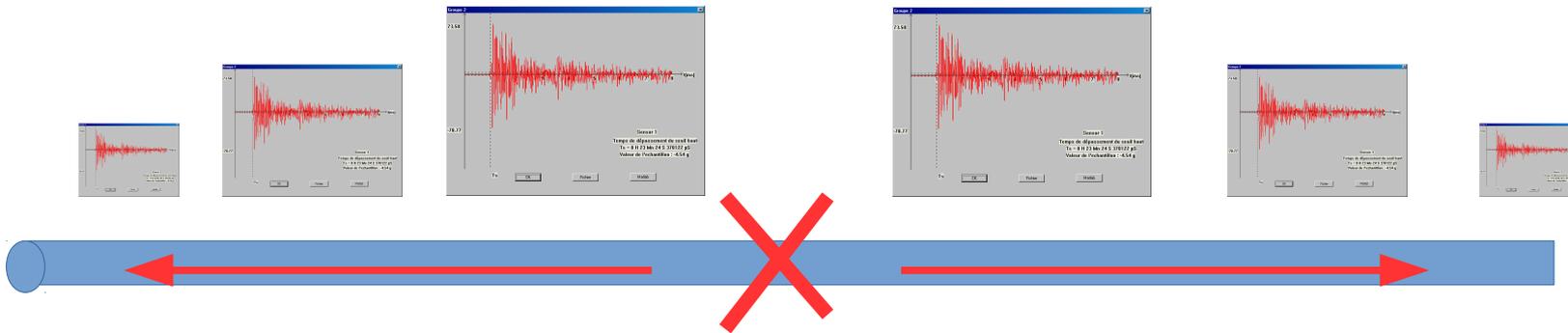
IHM et exploitation : Cloud !

3) Mise à jour « CASC nouvelle génération »

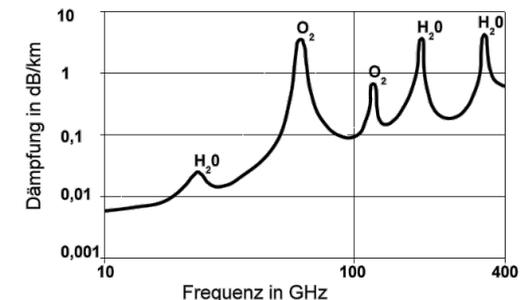
3.2 Mise à jour scientifiques :

Meilleure détection par meilleur filtrage du bruit par :

- détection en énergie pré/post trigger => seuils plus bas
- Vérification **cohérence spectre / atténuation/dispersion** longitudinale du mode « p »



$$\text{atténuation} = e^{-\alpha l}$$

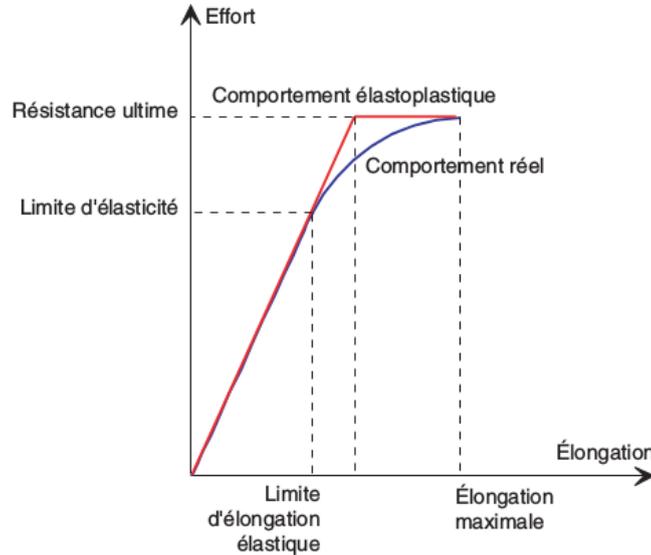
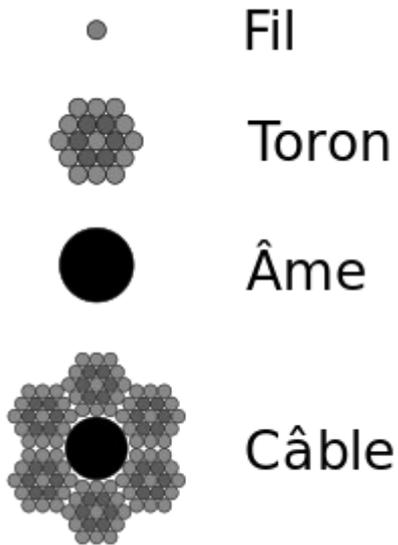


Dispersion et atténuation du spectre l'onde acoustique en $f(l, t)$

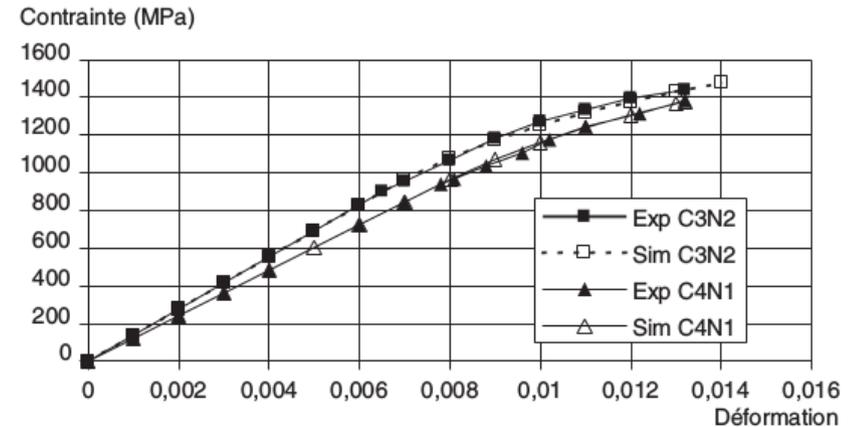
3) Mise à jour « CASC nouvelle génération »

3.3 Mise à jour scientifiques :

Intégrer des modèles statistiques et analytiques liés sur la rupture de fils et la **santé prévisionnelle du câble** pour tendre vers de la **maintenance prévisionnelle**



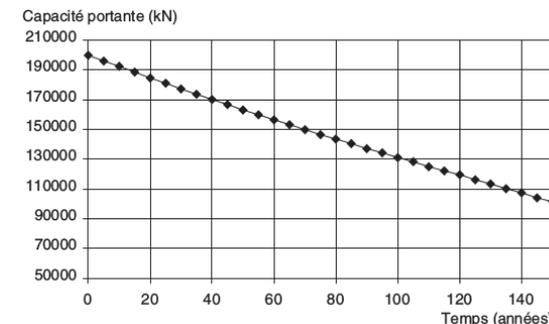
Comportement d'un fil



Comportement d'un toron

$$F_T(\mathbf{u}, t) = \sum_{i=1}^N F_{f,i}(\mathbf{u}, t)$$

Objectif : tendre vers un modèle prévisionnel de la capacité résiduelle portante du câble.

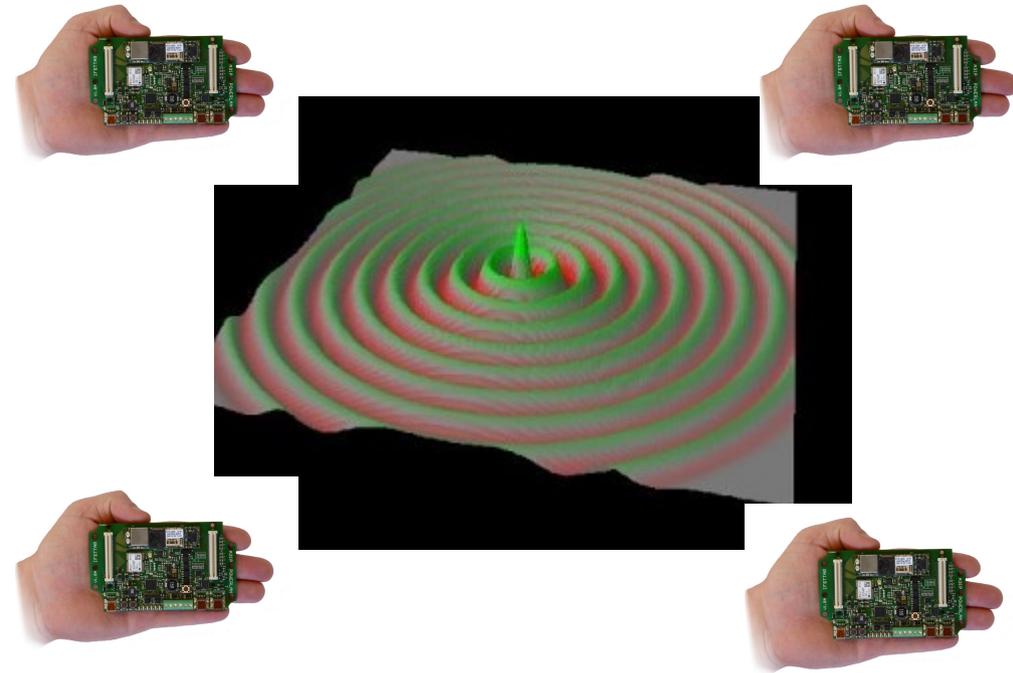
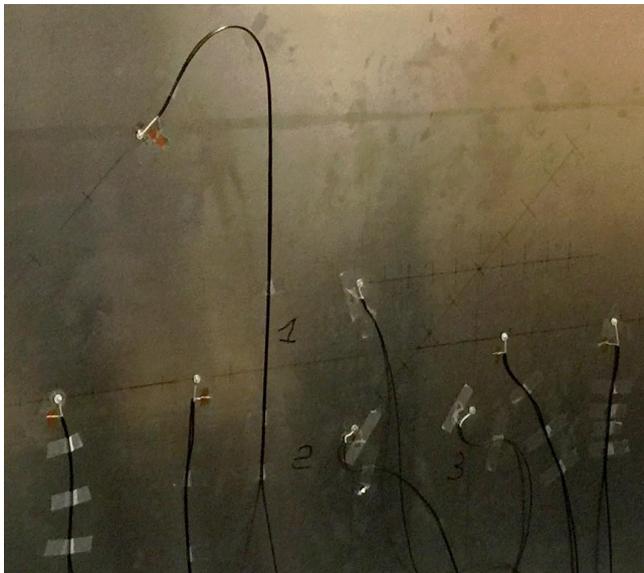
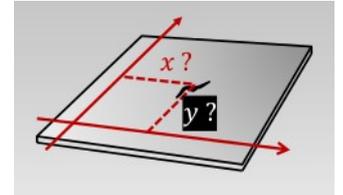


3) Mise à jour « CASC nouvelle génération »

3.4 Mise à jour scientifiques :

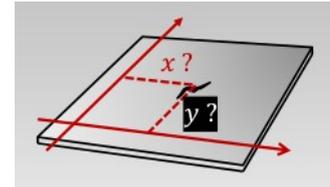
- Intégrer une localisation X et Y aux capteurs
- Et permettre l'extension du CASC à de la localisation 2D

Pour des applications à des structures 2D de type : plaque en métal, parement béton, etc...

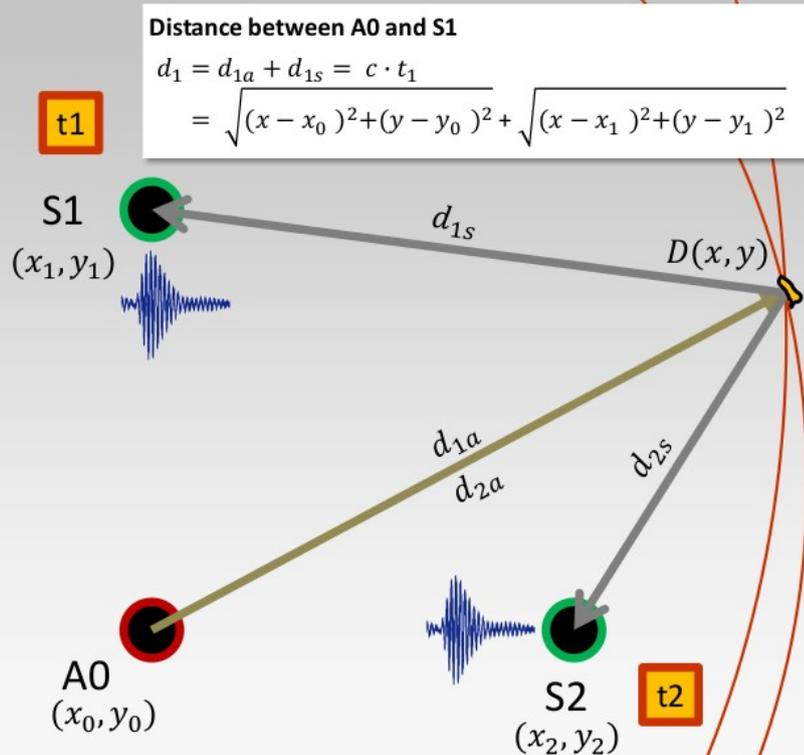


3) Mise à jour « CASC nouvelle génération »

3.4 Mise à jour scientifiques : localisation 2D

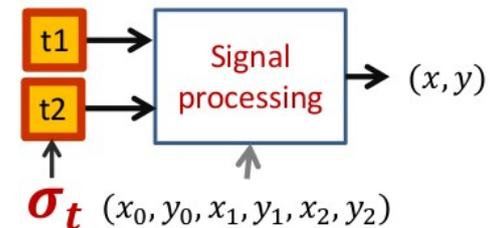


Principle of localization estimation #2



Objective of signal processing

Extract the damage coordinates (x, y) from t_1 & t_2



Distance between A0 and S2

$$d_2 = d_{2a} + d_{2s} = c \cdot t_2$$

$$= \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2}$$

4) Perspectives

CASC Nouvelle Génération :

- Mise à jour **technologique** forte : plus de souplesses (énergie, cloud...)
- Mise à jour **scientifiques** riches permettant de passer, modestement, de localisation de ruptures à du contrôle voire de la prédiction de santé des câbles
 - => nécessite de choisir et affiner les modèles stats et analytiques avec les experts de la profession
 - => nécessite des validations : simulation, long terme ...
- Volonté Ifsttar de **valorisation** (licence de diffusion du produit) auprès des experts du domaine
 - Sociétés qui diffusent, et/ou qui exploitent

